

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛА ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГООБЛОКОВ С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

Е.А. Крайнюк, А.С. Митрофанов, Л.С. Ожигов, В.И. Савченко
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: krainyuk@kipt.kharkov.ua, тел. +38(057)335-65-53

На кольцевых и продольных образцах из стали 08X18H10T как исходной, так и после длительной эксплуатации получены характеристики прочности и пластичности в тангенциальном и продольном направлениях. Проведён анализ полученных результатов. Установлено, что у металла после длительной эксплуатации наблюдается значительное снижение характеристик пластичности в тангенциальном направлении.

В горизонтальных парогенераторах ПГВ-1000, применяющихся на АЭС с энергоблоками ВВЭР-1000, в качестве теплообменника используются пучки труб $\varnothing 16 \times 1,5$ мм из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T. В процессе эксплуатации теплообменные трубы подвержены воздействию локальных видов коррозии, в результате чего на внешней поверхности теплообменных труб образуются дефекты: коррозионные язвы, пятна и трещины. Во избежание разгерметизации контура при значительном поражении металла ($\geq 70\%$) стенки трубки необходимо производить глушение труб. Наличие и величину дефектов определяют при планово-предупредительных ремонтах с помощью систем вихретокового контроля. Определяющим фактором при глушении теплообменных труб являются критерии глушения, учитывающие параметры основных сигналов вихретоковых систем – размер дефекта и его динамику роста.

Эксплуатация парогенераторов осуществляется в строго регламентированных режимах: водохимический режим, температура и давление теплоносителя, своевременное проведение химических отмывок и т. д. Однако, несмотря на это, металл теплообменных труб подвержен локальному эрозионно-коррозионному износу, в результате чего происходит разрушение труб и, как следствие, нарушение герметичности контура.

Характер разрушения проржавевшего металла исследовался ранее [1]. Был проведен сопоставительный анализ пределов прочности и пределов текучести при испытании кольцевых образцов с различными коррозионными дефектами, а также без них. В результате экспериментов показано, что наблюдается локальная потеря прочностных свойств в зоне коррозионных дефектов.

В работе [2] нами было показано, что вблизи дефектов образуются зоны охрупченного металла, локально пораженного межкристаллитной коррозией. Именно в этих местах можно ожидать изменения механических свойств. В процессе эксплуатации рабочее давление внутри теплообменных труб на 100 атм больше наружного, а при

переходных режимах и возможных гидроударах перепад давлений может быть еще большим. Это создает окружные растягивающие напряжения, создающие опасность разрушения, а наличие эксплуатационных дефектов усугубляет ситуацию [3].

В настоящей работе более детально рассматриваются вопросы прочности и пластичности металла теплообменных труб, длительное время находившихся в эксплуатационных условиях парогенератора ПГВ-1000.

МЕТОДИКА

Для рассмотрения возможной анизотропии свойств металла после эксплуатации были проведены механические испытания образцов, вырезанных вдоль труб, а также кольцевых образцов. Образцы для исследований и испытаний изготавливали из фрагментов теплообменных труб, вырезанных из парогенератора ПГВ-1000, длительное время проработавшего на АЭС и демонтированного по причине сверхнормативного количества заглушенных теплообменных труб. Для изготовления образцов отбирали фрагменты труб, работавшие в парогенераторе в зоне, которая была подвержена коррозии и имела наибольший процент глушения. Размеры и форма образцов для испытаний ограничивались геометрическими размерами труб, а также необходимостью отсутствия каких-либо коррозионных, механических и прочих повреждений поверхности металла, которые могли служить концентраторами напряжений. Эти требования обуславливали необходимость проведения испытания с применением микрообразцов.

Продольные образцы изготавливали в виде сегмента длиной 55 мм, вырезанного вдоль продольной оси трубы (рис. 1). Концы образцов выравнивали, перед тем как закрепить их в захватах испытательной машины. Длина рабочей части образцов, не учитывая переходные зоны, составляла 20 мм [4]. Благодаря упрочнению на концах образцов при их выравнивании разрывы всегда находились в рабочей части. Кольцевые образцы (см. рис. 1) имели размеры: $D_0 = 16$ мм; толщина стенки $a_0 = 1,5$ мм; ширина $b_0 = 3$ мм, т. е. сравнима с продольными образцами.



Рис. 1. Продольные (слева) и кольцевые (справа) образцы

Продольные образцы испытывали в соответствии с [5]. Испытания кольцевых образцов осуществляли путем растяжения с помощью двух

полудисковых опор (рис. 2), расположенных внутри образцов, аналогично тому, как описано в [6].



Рис. 2. Кольцевой (слева) и продольный (справа) образцы, установленные в захваты

Испытания проводили при температурах 20 и 300 °С в вакууме. Скорость растяжения составляла 1 мм/мин. В результате испытаний для металла теплообменных труб были определены в окружном и продольном направлениях пределы прочности: $\sigma_{\text{в}}^{+20}$ и $\sigma_{\text{в}}^{+300}$; условные пределы текучести: $\sigma_{0,2}^{+20}$, $\sigma_{0,2}^{+300}$, а также относительные удлинения: δ^{+20} и δ^{+300} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механические свойства металла теплообменных труб до и после их длительной эксплуатации в парогенераторе были определены путем статических испытаний на растяжение до момента разрыва кольцевых и продольных образцов при комнатной и рабочей температурах (+20 и +300 °С). Сравнение полученных результатов прочностных характеристик с данными нормативных документов показано в таблице.

Разброс приведенных средних значений характеристик прочности и пластичности, полученных при испытаниях, не превышал 10 %.

Из таблицы также видно, что при комнатной температуре для кольцевых и продольных образцов,

изготовленных из металла после длительной эксплуатации, величина напряжений, характеризующих переход к пластической деформации (предел текучести), отличается незначительно и находится в пределах ошибки измерений. Для кольцевых и продольных образцов исходного металла, испытанного при той же температуре, показания имеют большую разность, однако и они соответствуют данным нормативных документов.

Та же особенность отмечается и для значений пределов прочности, полученных при комнатной температуре, для исходного металла и металла после эксплуатации. В данном случае, как для исходного, так и отработанного металла предел прочности имеет значительно большие значения от 127 до 235 МПа по сравнению с требованиями для труб [7].

При сравнении прочностных характеристик кольцевых образцов с данными продольных образцов (независимо от состояния металла) видно, что для последних полученные значения пределов текучести и прочности выше. Это, по-видимому, объясняется технологией изготовления

теплообменных труб. Наибольшие различия наблюдаются для характеристик пластичности. Для кольцевых образцов из исходного металла при $T_{комн}$

относительное удлинение составляет 28 %, тогда как по ПНАЭ Г-7-002-86048 и ГОСТ 24030-80 оно должно быть не менее 35 %.

Механические свойства исходного и после эксплуатации металла теплообменных труб в продольном и окружном направлениях при комнатной и рабочей температурах

T, C°	Характер. прочности и пластичности	Исходный металл		После эксплуатации		ПНАЭ Г-7-002-86048*	ГОСТ 24030-80
		Кольцевые образцы	Продольные образцы	Кольцевые образцы	Продольные образцы		
+20	$\sigma_{0,2}$, МПа	402	451	441	431	216	176...343
	σ_B , МПа	637	745	647	715	510	549
	δ , %	28	53	48	53	35	≥ 35
+300	$\sigma_{0,2}$, МПа	363	-	363	363	176	-
	σ_B , МПа	451	-	431	470	412	-
	δ , %	24	-	13	49	26	-

*Для труб из стали этой же марки согласно ПНАЭ Г-7-002-86048.

Причиной этого может быть анизотропия материала, как следствие неоднородности структуры. Известно, что вязкость и пластичность конструкционных материалов в значительной мере зависят от характера обработки. Холодная пластическая деформация сопровождается искажением кристаллической решетки и появлением остаточных напряжений, изменяются физико-химические свойства. В результате возникают текстура и анизотропия свойств металла [8]. По отношению к вязкости разрушения анизотропия существует обычно во всех рабочих изделиях, в том числе и в прокате. Трубы для парогенераторов изготавливают путем протяжки в холодном состоянии. При этом возможно образование волокон – верениц продолговатых кристаллических зерен или групп включений, вызывающих внутренние напряжения. В какой-то степени анизотропия снимается термообработкой. Не исключено, что материал возвращается в напряженное состояние в условиях эксплуатации изделий. В общих случаях процесс образования волокон является причиной различия механических свойств, в частности, вязкости разрушения в образцах, ориентированных вдоль и поперек течения металла при его обработке.

Испытания при $T_{исп} = 300$ °С кольцевых и продольных образцов металла после длительной эксплуатации показали, что материал имеет запас по прочностным характеристикам в сравнении с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86048. Существенные отличия наблюдаются по пластичности: для кольцевых образцов (после эксплуатации) – 13 %, для продольных – 49 %. По требованиям ПНАЭ Г-7-002-86048 пластичность не должна быть менее 26 %. То есть в продольном направлении пластичность обеспечивается с запасом, тогда как окружная пластичность при 300 °С – существенно ниже. Некоторое снижение пластичности при 300 °С наблюдается и для кольцевых образцов из исходного металла (24 %).

Обнаруженное уменьшение окружной пластичности кольцевых образцов при 300 °С может существенно изменить представления о ресурсе теплообменных труб. Высокое давление теплоносителя приводит к развитию локальной пластической деформации в коррозионных дефектах [2]. Это усиливает процесс коррозии и уменьшает запас пластичности стали. В результате это может привести к образованию сквозных дефектов и протечек теплоносителя.

Таким образом, с точки зрения безопасной эксплуатации, наряду с пластичностью в продольном направлении сохранение достаточной пластичности в тангенциальном направлении является также важным.

Следует отметить, что использованная при испытаниях методика растяжения кольцевых образцов широко применяется в настоящее время как действенный способ определения механических свойств материалов трубных конструкций [6]. Однако особенностью методики является то, что кольцевой образец при растяжении распрямляется между опорами, и эта деформация может привести к искажениям получаемых результатов в сторону занижения значений, в частности пластичности. Учитывая это, а также практическую важность вопроса, считаем, что исследования высоко-температурной пластичности стали 08X18N10T теплообменных труб в тангенциальном направлении необходимо продолжить с учетом полученных результатов.

ВЫВОДЫ

Путем испытаний кольцевых и продольных образцов в тангенциальном и продольном направлениях экспериментально получены характеристики прочности и пластичности стали 08X18N10T (теплообменные трубы парогенераторов ПГВ-1000)

Проведенный анализ результатов показал, что при комнатной и рабочей температурах (300 °С)

металл теплообменных труб после длительной эксплуатации как в продольном, так и в тангенциальном направлениях сохранил достаточный запас по прочности и соответствует требованиям нормативной документации.

Установлено, что металл после эксплуатации имеет значения пластичности в тангенциальном направлении значительно ниже, чем исходный металл и ниже, чем пластичность в продольном направлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, Е.А. Крайнюк, В.И. Савченко, Ж.С. Ажажа. Влияние дефектов на характеристики прочности теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000 // *Проблемы прочности*. 2011, №2, с. 153-159.
2. Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, Е.А. Крайнюк, В.И. Савченко, В.Г. Лесная. Исследование характера разрушения теплообменных труб в области коррозионных дефектов // *Сб. науч. трудов СНИИЭ и П*. 2011, в. 1(37), с. 33-40.
3. А.С. Митрофанов, І.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов. Експлуатаційні дефекти в теплообмінних трубах парогенераторів АЕС // *Фізико-*

хімічна механіка матеріалів. 2008, т. 44, №4, с. 109-114.

4. ГОСТ 1497-84 (СТ СЭВ 471-77): Национальный стандарт Украины. *Металлы. Методы испытания на растяжение*. М.: «Изд-во стандартов», 1985.

5. ГОСТ 19040-81: Межгосударственный стандарт. Национальный стандарт Украины. *Трубы металлические. Методы испытания на растяжение при повышенных температурах*. М.: «Изд-во стандартов», 1981.

6. ДСТУ 2528-94: Национальный стандарт Украины. *Расчеты и испытания на прочность. Метод испытания на растяжение кольцевых образцов в условиях нагрева*. Киев: УКР НДІССІ, 1994.

7. ПНАЭ Г-7-002-86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. М.: «Энергоатомиздат», 1989.

8. С.Н. Зорчев, В.Н. Кузьминцев. *Общая технология кузнечно-штамповочного производства*. М.: «Высшая школа», 1986, 87 с.

Статья поступила в редакцию 01.09.2011 г.

МІЦНІСТЬ І ПЛАСТИЧНІСТЬ МЕТАЛУ ТЕПЛОБМІННИХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ З РЕАКТОРАМИ ВВЕР-1000

Є.О. Крайнюк, А.С. Митрофанов, Л.С. Ожигов, В.І. Савченко

На кільцевих і подовжніх зразках із сталі 08X18N10T як для початкової, так і після тривалої експлуатації отримані характеристики міцності і пластичності в тангенціальному і подовжньому напрямках. Проведено аналіз отриманих результатів. Встановлено, що для металу після тривалої експлуатації спостерігається значне зниження характеристик пластичності в тангенціальному напрямі.

STRENGTH AND DUCTILITY OF METAL OF HEAT-EXCHANGING TUBES OF STEAM GENERATOR OF POWER UNITS WITH REACTORS WWER-1000

Y.A. Krainyuk, A.S. Mitrofanov, L.S. Ozhigov, V.I. Savchenko

On ring and longitudinal samples from a steel 08Cr18Ni10Ti as initial state, and after long operation characteristics of strength and ductility in tangential and longitudinal directions are received. The analysis of the received results is carried out. It is established, that for metal after long operation considerable decrease in characteristics of ductility in a tangential direction is observed.